

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛОВОГО ШАГА РАЗВЕРТКИ  
НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ****Мальшко И.А., Киселева И.В.***(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)***Введение**

Наиболее распространенным методом чистовой обработки отверстий является развертывание, которое должно обеспечить требуемую чистоту и точность обработанных отверстий. Однако, при развертывании наблюдается огранка обработанного отверстия, величина которой, согласно исследованиям [1], часто превышает величину поля допуска на размер. Наличие огранки оказывает отрицательное влияние на эксплуатационные характеристики изделия. Это связано с тем, что контакт сопряженных изделий происходит только по вершинам микронеровностей и отношение фактической площади контакта к номинальной может достигать 0,3-0,5. Поэтому уменьшение величины огранки обработанных отверстий является важной проблемой.

Одной из причин появления огранки являются вынужденные колебания технологической системы. Причинами вынужденных колебаний могут быть внешние силовые и кинематические воздействия на систему и воздействия, связанные с изменением процесса резания. Устранить все причины, приводящие к возникновению вынужденных колебаний, невозможно, поэтому избежать появления огранки также невозможно.

Для уменьшения величины огранки применяют развертки с неравномерным расположением зубьев. В этом случае уменьшение огранки происходит за счет изменения кинематики движения зубьев и частоты их колебаний. Однако и в этом случае величина огранки остается достаточно большой.

Целью данной работы является поиск способов повышения точности обработки отверстий при развертывании за счет уменьшения величины огранки.

**Основная часть**

В процессе развертывания в технологической системе возникают радиальные, осевые и крутильные колебания центра инструмента. Колебаниями, порождающими огранку, могут быть только колебания, изменяющие сумму проекций сил резания на координатные оси, то есть радиальные колебания.

Согласно исследованиям [2] крутильные колебания не оказывают влияния на осевые и радиальные. Взаимное влияние осевых и радиальных колебаний наблюдается только в том случае, если амплитуда радиальных колебаний меньше величины

$$X = S_z \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $S_z$  – подача на зуб, мм/зуб,

$\varphi$  – главный угол в плане, град.

Предварительные эксперименты показали, что при развертывании это соотношение выполняется всегда. Поэтому радиальные колебания допустимо считать независимыми от крутильных и осевых.

Для описания движения зубьев развертки введем две системы координат: неподвижную  $XOY$ , начало которой совпадает с осью предварительно обработанного отверстия, и подвижную  $X_1O_1Y_1$ , начало которой совпадает с осью развертки. Если принять допущение, что развертка установлена без эксцентриситета, то перед началом обработки начала этих двух систем будут совпадать.

Появление огранки связано с тем, что траектория движения каждой пары зубьев развертки относительно неподвижной системы координат  $XOY$  формируется в результате сложения двух движений: вращения развертки вокруг своей оси, которое описывается в подвижной системе координат  $X_1O_uY_1$ , и колебательного движения ее центра вокруг оси предварительно обработанного отверстия в системе координат  $XOY$ . Поэтому для определения траектории движения зубьев развертки необходимо знать уравнения траектории движения зубьев в системе координат  $X_1O_uY_1$  и центра в системе координат  $XOY$ .

Анализ круглограмм отверстий, обработанных развертками показал, что центр развертки совершает колебательное движение с амплитудой  $A = 0,01-0,012$  мм, траектория этого движения близка к окружности, направление движения противоположно направлению вращения развертки, а период колебаний определяется зависимостью

$$T_z = \frac{T}{2Z},$$

где  $T$  – время, в течение которого развертка совершает один оборот,

$Z$  – число пар зубьев развертки.

При равномерном расположении зубьев развертки траектории движения всех пар зубьев совпадают, и величина огранки отверстия будет равна двойной амплитуде колебаний центра развертки.

$$\Delta = \rho_{max} - \rho_{min} = 2A,$$

где  $\rho_{max} = R + A$  – максимальный радиус траектории движения зубьев,

$\rho_{min} = R - A$  – минимальный радиус траектории движения зубьев.

При использовании развертки с неравномерным расположением зубьев траектория, описываемая парой зубьев  $(k + 1)$  в подвижной системе координат  $X_1O_uY_1$ , смещена относительно траектории, описываемой парой зубьев  $k$ , на угол  $\Delta\Theta$ , равный разности угловых шагов зубьев. Относительно неподвижной системы координат  $XOY$  это смещение составит угол  $\Delta\Psi = 2Z\Delta\Theta$ , равный углу поворота центра развертки за время поворота зубьев на угол  $\Delta\Theta$ .

Следовательно, если траектория движения пары зубьев 2-2 соответствует траектории движения зубьев развертки с равномерным угловым шагом, то траектории пар зубьев 1-1 и 3-3 будут симметрично смещены относительно нее на угол  $\pm \Delta\Psi$  (рис. 1).

Рис. 1. Образование огранки при использовании развертки с неравномерным угловым шагом

1-4 – траектории движения различных пар зубьев развертки

Траектории, описываемые двумя любыми парами зубьев развертки, пересекаются в течение одного периода колебаний центра развертки в двух точках  $A$  и  $C$ , смещенных друг относительно друга на величину  $\pi$ . Величина огранки отверстия в этом случае будет равна

$$\Delta = \rho_{A(1-k)} - \rho_{C(1-k)}, \quad (1)$$

где  $\rho_{A(1-k)}$  и  $\rho_{C(1-k)}$ , – радиусы, определяющий положение точек пресечения траекторий движения пар зубьев 1-1 и  $k-k$  соответственно.

Уравнения колебательного движения центра развертки относительно неподвижной системы координат  $XOY$  имеют вид

$$\begin{aligned} X_{ou} &= A \cos \omega_0 t, \\ Y_{ou} &= A \sin \omega_0 t, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\omega_0$  – круговая частота колебаний центра.

Положение каждого зуба развертки в подвижной системе  $X_1O_1Y_1$  определится зависимостью

$$\begin{aligned} X_{1k} &= R \cos \theta_k, \\ Y_{1k} &= R \sin \theta_k, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\theta_k$  – угол, определяющий положение  $k$ -ой пары зубьев развертки при неравномерном их распределении.

Формулы перехода подвижной системы координат в неподвижную имеют вид

$$\begin{aligned} X &= X_{ou} \cos \omega t - Y_{ou} \sin \omega t, \\ Y &= X_{ou} \sin \omega t + Y_{ou} \cos \omega t, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\omega$  – круговая частота вращательного движения развертки.

В неподвижной системе координат  $XOY$  каждая пара зубьев будет совершать эксцентричное вращательное движение, уравнение которого будет иметь вид

$$\begin{aligned} X_k &= X_{ou} + X_{1k} = R \cos(\omega t + \theta_k) + A \cos \omega_0 t, \\ Y_k &= Y_{ou} + Y_{1k} = R \sin(\omega t + \theta_k) + A \sin \omega_0 t. \end{aligned} \quad (5)$$

Радиус-вектор траектории движения первой пары зубьев опишется уравнением

$$\rho_1 = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2} = \sqrt{A^2 + R^2 + 2AR \cos(\omega_0 + \omega)t}. \quad (6)$$

Траектория движения второй пары зубьев будет смещена относительно траектории движения первой пары на угол  $\Delta\Psi_k = 2Z\Delta\Theta$ . Тогда траектория движения  $k$ -ой пары зубьев опишется уравнением

$$\rho_k = \sqrt{X_k^2 + Y_k^2} = \sqrt{A^2 + R^2 + 2AR \cos[(\omega_0 + \omega)t - 2Z(k-1)\Delta\Theta]}. \quad (7)$$

Время пересечения траекторий движения различных пар зубьев можно найти из условия равенства радиусов этих траекторий в момент пересечения в точках  $A$  и  $C$   $\rho_{A1} = \rho_{Ak}$  и  $\rho_{C1} = \rho_{Ck}$ . Приравняв правые части уравнений (6) и (7), найдем время пересечения траекторий движений пар зубьев 1-1 и  $k-k$  в точке  $A$

$$t_{A(1-k)} = \frac{Z(k-1)\Delta\theta}{\omega_0 + \omega}. \quad (8)$$

Соответственно время пересечения траекторий в точке С, соответствующей максимальной величине огранки отверстия, будет равно

$$t_{C(1-k)} = \frac{\pi + Z(k-1)\Delta\theta}{\omega_0 + \omega}. \quad (9)$$

Подставив значение времени в уравнения (6) и (7), а затем значение  $\rho_{C1}$  в выражение (1), получим уравнение, характеризующее изменение огранки отверстия в зависимости от количества зубьев развертки и разности угловых шагов

$$\Delta = A - A \cos[\pi + Z(Z-1)\Delta\theta]. \quad (10)$$

То есть, значение огранки будет уменьшаться при увеличении разности угловых шагов зубьев развертки.

Предельным случаем, при котором огранка будет отсутствовать, является случай, когда  $\rho_{C(1-k)} = \rho_{A(1-k)}$ . Для этого случая найдем минимальную разность угловых шагов зубьев развертки.

Значения радиусов движения зубьев в точках А и С будут равны:

$$\begin{aligned} \rho_{c(1-k)} &= R + A \cos[\pi + Z(Z-1)\Delta\theta], \\ \rho_{A(1-k)} &= R + A \cos\Delta\theta. \end{aligned} \quad (11)$$

Минимальная величина огранки отверстия будет наблюдаться в том случае, когда  $\rho_{C(1-k)} \leq \rho_{A(1-k)}$ .

Приравняв правые части уравнений (11), получим

$$R + A \cos[\pi + Z(Z-1)\Delta\theta] = R + A \cos\Delta\theta. \quad (12)$$

После преобразований равенство (12) будет иметь вид

$$\Delta\theta^2 Z^2 [1 - (Z-1)^2] - 2\Delta\theta Z(Z-1)\pi - \pi^2 = 0.$$

Это квадратное уравнение имеет два действительных корня

$$\Delta\theta_1 = \frac{\pi}{Z^2}, \quad \Delta\theta_2 = \frac{\pi}{Z(Z-2)}.$$

Цели исследований – определению минимальной разности угловых шагов, обеспечивающей минимальное значение огранки отверстия, – удовлетворяет первый корень уравнения. Поэтому это значение разности угловых шагов использовали при проведении экспериментальных исследований.

Уменьшение величины огранки отверстия при использовании разверток с неравномерным расположением зубьев может происходить также за счет срезания следа, оставленного предыдущим зубом, вспомогательной режущей кромкой следующего зуба. Это возможно только в том случае, когда радиус округления вспомогательной режущей кромки меньше толщины среза, приходящегося на эту кромку. Экспериментальные исследования показали, что после обработки 9-10 отверстий радиус округления вспомогательной режущей кромки развертки составляет 0,008-0,012 мм, а величина усадки отверстия, определяемая упругим последствием обрабатываемого материала, равна 0,008 мм. Поэтому можно предположить, что резание вспомогательными режущими кромками будет происходить только при толщине среза на них превышающей

0,008 мм. Поэтому целесообразным является определить толщину среза, приходящуюся на вспомогательную режущую кромку каждого зуба.

Толщина среза, снимаемая калибрующим участком второй пары зубьев со следа оставленного первой парой, будет равна

$$a_e = A \cos(\omega_0 + \omega)t - A \cos[(\omega_0 + \omega)t + 2Z\Delta\theta].$$

Аналитические расчеты показали, что с увеличением разности угловых шагов  $\Delta\theta$  толщина среза на вспомогательной режущей кромке увеличивается и при значении  $\Delta\theta > 5^\circ$  становится больше величины упругого последействия обработанной поверхности. То есть существует минимальная разность угловых шагов, при которой дополнительное уменьшение огранки отверстия будет происходить за счет резания вспомогательными режущими кромками.

Однако, кроме кинематики движения зубьев, на величину огранки отверстий большое влияние оказывают динамические процессы, происходящие на главной режущей кромке зуба развертки [3]. Наличие этих процессов приводит к тому, что для каждого числа зубьев развертки существует минимально допустимая величина разности угловых шагов, при которой огранки минимальна. С учетом кинематики и динамики движения зубьев минимальная величина огранки наблюдается при разности угловых шагов  $\Delta\theta \geq 5^\circ 42'$  – для разверток с числом пар зубьев  $Z = 4$  и  $\Delta\theta \geq 10^\circ 30'$  – для разверток с числом пар зубьев  $Z = 3$ .

Для подтверждения теоретических данных были проведены экспериментальные исследования. Исследования проводили при обработке отверстий в заготовках из стали 45 и серого чугуна разверткой диаметром 16 мм с числом пар зубьев  $Z = 4$ . Скорость резания составляли 3 м/мин, подача – 1,6 мм/об. Результаты приведены на рис. 2.

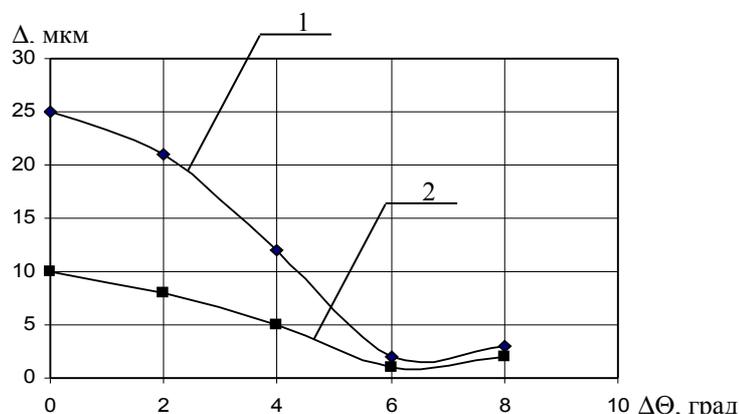


Рис. 2. График зависимости величины огранки от разности угловых шагов развертки:

1 – обработка чугуна СЧ 28-48; 2 – обработка стали 45

Как видно из графика, наибольшую величину огранки имеют отверстия, обработанные разверткой с равномерным угловым шагом. Увеличение разности угловых шагов до  $\Delta\theta = 2^\circ$  приводит к уменьшению огранки при обработке стали с 11 мкм до 8 мкм. Теоретическое уменьшение величины огранки, рассчитанное по формуле (10), составляет 0,5 мкм. Более значительное уменьшение реальной величины огранки при увеличении разности угловых шагов связано со срезанием калибрующими кромками последующей пары зубьев развертки следа, оставленного предыдущей парой.

Эксперименты показали, что наименьшую величину огранки обеспечивает обработка развертками с разностью угловых шагов  $\Delta\Theta = 6^\circ$ , причем дальнейшее увеличение разности угловых шагов при обработке стали не приводит к уменьшению величины огранки, а при обработке чугуна огранка даже немного увеличивается.

### **Выводы**

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод, что для разверток с числом пар зубьев  $Z = 4$  с увеличением разности угловых шагов  $\Delta\Theta$  величина огранки сначала резко уменьшается, а после достижения критического значения практически не меняется. Это связано с тем, что при разности угловых шагов, большей минимально допустимой величины, окончательное формирование огранки отверстия происходит за счет срезания калибрующими кромками последующей пары зубьев развертки следов, оставленных предыдущей парой. Эти результаты хорошо согласуются с теоретическими данными.

**Список литературы:** 1. Малышко И.А. Основы теории проектирование осевых комбинированных инструментов: Диссертация докт. техн. наук 05.03.01. – Киев. 1996. – 430с. 2. Ольшанский Н.Ф. Определение вынужденных сил и параметров автоколебаний при обработке отверстий осевым инструментом/ Автоматизация производственных процессов в сельхозмашиностроении. Научные труды Ростовского-на-Дону института сельскохозяйственного машиностроения. – Выпуск 10. – Ростов-на-Дону, 1988. – С. 59-64. 3. Малишко І.О. Кисельова І.В. Аналіз шляхів підвищення точності обробки при розвертуванні/ Наукові праці ДонНТУ. Серія Машинобудування і машинознавство. Випуск 110. – Донецьк: ДонНТУ, 2006.– С. 53-59.

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КУТОВОГО ШАГУ РОЗВЕРТКИ НА ТОЧНІСТЬ ОБРОБКИ**

Малишко І.О., Кисельова І.В.

Проведено дослідження впливу схеми розподілу зубців розвертки на точність обробки отворів. Установлено, що зменшення величини різності кутових кроків розвертки веде до зменшення огранювання отворів. Для кожного числа зубців існує мінімально припустима різність кутових кроків, при якій огранювання буде мінімальним.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛОВОГО ШАГА РАЗВЕРТКИ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ**

Малышко И.А., Киселева И.В.

Исследовано влияние схемы расположения зубьев развертки на точность обработки отверстий. Установлено, что уменьшение величины разности угловых шагов развертки приводит к уменьшению огранки отверстий. Для каждого числа зубьев существует минимально допустимая разность угловых шагов, при которой огранка будет минимальной.

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF ANGULAR STEP OF REAMER  
ON THE ACCURACY OF MACHINING

Malyshko I.A., Kiselyova I.V.

The influence of the layout scheme of teeth of reamer on accuracy of hole machining is researched. It is established that the decrease of value of difference of angular steps of reamer causes the decrease of facet pattern of holes. For each number of teeth there is a minimum permissible difference of angular steps, at which the facet pattern of holes will be minimal.

*Рецензент: д.т.н., проф. Матюха П.Г.*